

# **“ESTUDIO DE COORDINACIÓN DE LAS PROTECCIONES ELECTRICAS POR MÉTODOS COMPUTARIZADOS APLICADOS A LA SUBESTACIÓN GUAYACANES”**

Jorge Leandro Segovia Tello, Pedro Andrés Aguirre Marret, Diego Fernando Pino Guanoluiza  
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador

[jorge\\_lesegovia@hotmail.com](mailto:jorge_lesegovia@hotmail.com), [pedres\\_23@hotmail.com](mailto:pedres_23@hotmail.com), [dxp007@hotmail.es](mailto:dxp007@hotmail.es)

Juan Saavedra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ingeniero Eléctrico Especialidad Potencia,  
[jsaavedra@hidronacion.org](mailto:jsaavedra@hidronacion.org)

## Resumen

“Estudios de coordinación de las protecciones eléctricas por métodos computarizados aplicados a la Subestación Guayacanes.” tiene como objetivo principal coordinar el sistema de protecciones de la Subestación mencionada mejorando su nivel de confiabilidad y continuidad de servicio al área residencial de la ciudad de Guayaquil coordinando de una manera adecuada todos los elementos de protección existentes en la Subestación.

Tras realizar el levantamiento en el que se recopilaron todos los datos del sistema eléctrico de la Subestación, se procedió a realizar los estudios de flujo de carga, análisis de corto circuito para finalmente proponer un sistema adecuado de protecciones mediante el uso de herramientas modernas con la finalidad de aumentar eficiencia, la selectividad y continuidad de servicio del sistema.

Palabras Claves: Coordinación, Flujo de Carga, Corto Circuito, Relé TPU 2000R ABB.

## Abstract

Studies of electrical protection coordination by computerized methods applied to Guayacanes Substation." Main objective is to coordinate the safeguards system of the substation mentioned improving their reliability and continuity of service to the residential area of the city of Guayaquil coordinating of a proper way all the elements of protection in the substation.

After conducting the survey in which data was collected of all the electrical system of the substation, we proceeded to perform the load flow studies, short circuit analysis to finally propose an adequate system of protection by using modern tools in order to increase efficiency, selectivity and system service continuity.

Key Words: Coordination, Load Flow Studies.

## 1. Introducción

El presente trabajo corresponde al proyecto final de la materia de graduación “Estudio de la Coordinación de las Protecciones en base a Herramientas Computacionales Aplicables a Sistemas de Distribución”.

Los sistemas coordinados de protección representan no solo seguridad, selectividad y continuidad de servicio, sino también intervienen factores económicos. Un sistema de protecciones muy bien coordinado ayuda a justificar, la inversión que realizan las empresas, en este caso la “Empresa Eléctrica de Guayaquil”, al adquirir equipos tales como transformadores de potencia, transformadores de distribución, generadores, líneas de transmisión y breakers de alta tensión.

Además, el estudio de coordinación de las protecciones eléctricas requiere de etapas previas al mismo que garanticen una manera segura y óptima la calibración y ajuste de los dispositivos a usar en el sistema de protecciones eléctricas siendo el análisis de flujo de carga y el de corto circuito las más importantes y necesarias. La primera permite establecer las condiciones actuales de los elementos del sistema eléctrico, mientras que el análisis de corto circuito determina la magnitud de los esfuerzos eléctricos a los cuales podrían ser sometidos los equipos del sistema, en caso de producirse una falla de determinadas características ya sean producidas por descargas atmosféricas u otros factores comunes en sistemas de distribución.

Por tal motivo es que “Estudios de coordinación de las protecciones eléctricas por métodos computarizados aplicados a S/E Guayacanes” describe y analiza dichas etapas con el fin de establecer los criterios bajo los cuales se propondrá un sistema de protecciones coordinado basado en el uso de herramientas computacionales.

## 2. Descripción General del Sistema Eléctrico

La subestación Guayacanes es alimentada por la ELECTRICA DE GUAYAQUIL a nivel de 69 KV, a este nivel hay un seccionador de aire con cuchillas de tierra el cual se conecta mediante cables # 4/0 ACSR, luego se conecta al interruptor en gas SF6 (GCB) y este a su vez al lado de alta del transformador de poder de capacidad 18/24 MVA,  $\Delta$  / Y, OA, FA respectivamente cuya relación de transformación es de 67 KV / 13.8 KV, posee una impedancia de corto circuito de 6.97% el cual es protegido con un RELE TPU 2000 R cuya marca es ABB el cual se conecta a un seccionador de aire principal de 1200 amperios en baja, la cual alimenta a la barra “principal 13.8 KV.

Para aumentar la confiabilidad la S/E Guayacanes tiene una configuración de barra principal y de transferencia. De la barra “principal 13.8 KV” salen 4 alimentadoras cada una protegida mediante Reconectores.

## 3. Estudios de Flujo de Carga

### 3.1 Criterios Adoptados para el Estudio

**3.1.1 Flexibilidad Operacional.** El sistema podrá funcionar alimentado por la Empresa Eléctrica sin ninguna restricción.

**3.1.2 Niveles de Confiabilidad.** El sistema debe proveer la continuidad del servicio y la alimentación a todas las instalaciones en forma prioritaria, ante la existencia de falla de un elemento del Sistema.

**3.1.3 Niveles de Sobrecarga.** No se aceptan sobrecarga en los cables del Sistema mayores a la cargabilidad establecida en las especificaciones técnicas. Para el caso de los Transformadores Convencionales de Fuerza, la carga no debe exceder su capacidad OA.

**3.1.4 Regulación de Voltaje.** Los voltajes a nivel de barras del Sistema no deben exceder del 2.5% hacia arriba y 2.5% hacia abajo, ante cualquier contingencia operativa.

### 3.2 Análisis de la Situación Actual de Carga de la Subestación

#### 3.2.1 Curvas de carga diaria



Figura 3.1 Curva de Carga Diaria Guayacanes#1

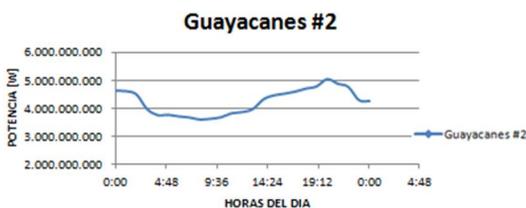


Figura 3.2 Curva de Carga Diaria Guayacanes#2

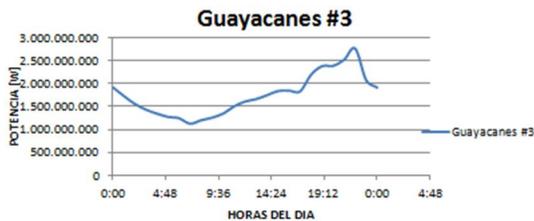


Figura 3.3 Curva de Carga Diaria Guayacanes#3



Figura Curva de Carga Diaria Guayacanes#4

### 3.3 Datos del Sistema

#### 3.3.1 Datos de las Líneas

Líneas		Distancia (m)		Impedancia en p.u.	
Barras	Barras	Metros	R	X	
Barra de 13,8 kv	Gyc 1	152	0,01519	0,03158	
Barra de 13,8 kv	Gyc 2	136	0,01359	0,02826	
Barra de 13,8 kv	Fusibles 3	1259	0,12581	0,2616	
Barra de 13,8 kv	Gyc 4	1477	0,14759	0,30689	
Gyc 1	Fusibles 1	184	0,01839	0,03823	

Gyc 1	Gyc 1.1	142	0,01419	0,02951
Fusibles 1	Fusibles 1.1	250	0,02498	0,05195
Gyc 2	Gyc 2.1	130	0,01299	0,02701
Gyc 2.1	Fusibles 2	53	0,0053	0,01101
Gyc 2.1	Fusibles 2.1	162	0,01619	0,03366
Fusibles 2.1	Gyc 2.2	200	0,01999	0,04156
Gyc 2.2	Fusibles 2.2	180	0,01799	0,0374
Fusibles 3	Fusibles 3.1	400	0,03997	0,08311
Gyc 4	Fusible 4	100	0,00999	0,02078
Gyc 4	Fusible 4.1	500	0,04996	0,10389
Fusible 4.1	Fusible 4.2	500	0,04996	0,10389

Tabla 1. Datos de las Líneas

#### 3.3.2 Datos del Transformador de Poder

Transformador de Potencia de la Subestación						
Marca	Potencia	Z%	V1	V2	Tipo de Conexión	TAP
ABB	18/24 MVA	6.97	67KV	13.8 KV	$\Delta$ -Y aterrizado	+2.5

Tabla 2. Datos del Transformador de Poder

### 3.4 Resultados de los Estudios de Flujo de Carga

El análisis de flujo de carga muestra lo siguiente:

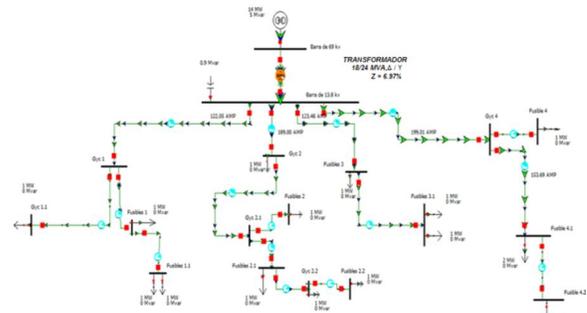


Figura 3.4 Estudio de Flujo de Carga

### 3.5 Voltajes en las Barras del Sistema

Barra	Máxima Generación			Mínima Generación		
	Volt Nom. kv	Volt p.u.	Volt (kv)	Volt Nom. kv	Volt p.u.	Volt (kv)
Barra de 69 kv	69	1	69	69	1	69
Barra de 13,8 kv	13,8	0,98726	13,624	13,8	0,99362	13,712
Gyc 1	13,8	0,98657	13,615	13,8	0,99315	13,706
Fusibles 1	13,8	0,986	13,607	13,8	0,99284	13,701
Fusibles 1.1	13,8	0,98552	13,6	13,8	0,99257	13,697
Gyc 1.1	13,8	0,98636	13,612	13,8	0,99295	13,703
Gyc 2	13,8	0,98612	13,609	13,8	0,99254	13,697
Gyc 2.1	13,8	0,98527	13,597	13,8	0,99165	13,685
Fusibles 2	13,8	0,98518	13,595	13,8	0,99159	13,684
Fusibles 2.1	13,8	0,98451	13,586	13,8	0,99072	13,672
Gyc 2.2	13,8	0,98394	13,578	13,8	0,9899	13,661
Fusibles 2.2	13,8	0,98368	13,575	13,8	0,98931	13,652
Fusibles 3	13,8	0,98131	13,542	13,8	0,98962	13,657
Fusibles 3.1	13,8	0,97998	13,524	13,8	0,98886	13,646
Gyc 4	13,8	0,97683	13,48	13,8	0,9885	13,641

Fusible 4	13,8	0,97665	13,478	13,8	0,9884	13,64
Fusible 4.1	13,8	0,97424	13,445	13,8	0,98726	13,624
Fusible 4.2	13,8	0,97307	13,428	13,8	0,98664	13,616

Tabla 3. Voltajes en las Barras del Sistema

### 3.6 Carga en los Conductores y Transformador de Poder

Desde Barra	Hasta Barra	MW	Mvar	MVA	Lim MVA	% of MVA	Perdidas MW	Perdidas Mvar
Barra 69 kv	Barra 13,8 kv	14,3	4,9	15,1	18	83,8	0	0,87
Barra 13,8 kv	Gyc 1	2,8	0,8	2,9	10	28,8	0	0
Barra 13,8 kv	Gyc 2	4,2	2	4,6	10	46,4	0	0,01
Barra 13,8 kv	Fusibles 3	2,8	0,9	2,9	10	29,1	0,01	0,02
Barra 13,8 kv	Gyc 4	4,5	1,2	4,7	10	47	0,03	0,07
Gyc 1	Fusibles 1	1,8	0,6	1,9	10	18,6	0	0
Gyc 1	Gyc 1.1	1	0,2	1	10	10,2	0	0
Fusibles 1	Fusibles 1.1	1	0,4	1,1	10	10,9	0	0
Gyc 2	Gyc 2.1	3,2	1,6	3,6	10	35,7	0	0
Gyc 2.1	Fusibles 2	1	0,4	1,1	10	10,7	0	0
Gyc 2.1	Fusibles 2.1	2,2	1,2	2,5	10	24,9	0	0
Fusibles 2.1	Gyc 2.2	1,2	0,8	1,4	10	14,3	0	0
Gyc 2.2	Fusibles 2.2	0,6	0,4	0,7	10	7,2	0	0
Fusibles 3	Fusibles 3.1	2	0,6	2,1	10	20,9	0	0
Gyc 4	Fusible 4	1	0,4	1,1	10	10,7	0	0
Gyc 4	Fusible 4.1	3,5	0,8	3,6	10	35,9	0,01	0,01
Fusible 4.1	Fusible 4.2	1,5	0,4	1,5	10	15,5	0	0

Tabla 4. Carga en los Conductores y Transformador de Poder (Máxima Generación)

Desde Barra	Hasta Barra	MW	Mvar	MVA	Lim MVA	% of MVA	Perdidas MW	Perdidas Mvar
Barra 69 kv	Barra 13,8 kv	10,3	3,1	10,7	18	59,6	0	0,44
Barra 13,8 kv	Gyc 1	1,5	0,7	1,7	10	16,9	0	0
Barra 13,8 kv	Gyc 2	4,2	1,8	4,6	10	45,9	0	0,01
Barra 13,8 kv	Fusible s 3	1,8	0,6	1,9	10	19,3	0	0,01
Barra 13,8 kv	Gyc 4	2,7	0,4	2,7	10	27,3	0,01	0,02
Gyc 1	Fusible s 1	0,5	0,6	0,8	10	7,6	0	0
Gyc 1	Gyc 1.1	1	0,2	1	10	10,2	0	0
Fusible s 1	Fusible s 1.1	0,3	0,4	0,5	10	5	0	0
Gyc 2	Gyc 2.1	3,7	1,5	4	10	40,1	0	0
Gyc 2.1	Fusible s 2	0,5	0,3	0,6	10	5,8	0	0
Gyc 2.1	Fusible s 2.1	3,2	1,2	3,4	10	34,3	0	0
Fusible s 2.1	Gyc 2.2	2,2	0,9	2,4	10	23,8	0	0
Gyc 2.2	Fusible s 2.2	2	0,6	2,1	10	20,9	0	0
Fusible s 3	Fusible s 3.1	1	0,4	1,1	10	10,9	0	0
Gyc 4	Fusible 4	0,7	0,1	0,7	10	6,9	0	0
Gyc 4	Fusible 4.1	2	0,2	2	10	20,3	0	0

Fusible 4.1	Fusible 4.2	1	0,1	1	10	10,1	0	0
-------------	-------------	---	-----	---	----	------	---	---

Tabla 5. Carga en los Conductores y Transformador de Poder (Mínima Generación)

## 4. Estudio de Corto Circuito

### 4.1 Alcance de los Estudios de Corto Circuito

Considerando que el Sistema Eléctrico de Guayaquil se caracteriza por ser un sistema sólidamente aterrizado el estudio de corto circuito considera los siguientes tipos de falla:

- Falla Trifásica a tierra
- Falla de línea a tierra

La falla trifásica a tierra es a menudo, para este tipo de sistema, la más severa de todas, por ello es costumbre de simular solamente la falla trifásica cuando se busca las magnitudes máximas de corriente de falla; sin embargo se verificara que la corriente de falla a tierra no exceda la corriente trifásica.

### 4.2 MVA de Corto Circuito

Tipo falla	Potencia de falla [MVA]	Corriente de Falla [Amp]
Trifásica (LLL)	528	4417
Línea-Tierra (L-T)	362	3033
Base: 100 [MVA] ; 69 [kv]		

Tabla 6. Potencia de Cortocircuito (Máx. Gen.)

Tipo falla	Potencia de falla [MVA]	Corriente de Falla [Amp]
Trifásica (LLL)	491	4412
Línea-Tierra (L-T)	351	2933
Base: 100 [MVA] ; 69 [kv]		

Tabla 7. Potencia de Cortocircuito (Mín. Gen.)

### 4.3 Impedancias Equivalentes en el Punto de Entrega

IMPEDANCIAS EQUIVALENTES PARA MAXIMA GENERACION			
Secuencia	R+jX [Ohms]	R+jX [p.u.]	X/R=
Ze(+)=	1.3455 +j8.9183	0.0282605 +j0.1873189	6.6283
Ze(0)=	2.2790 +j 21.2547	0.0478683 +j0.4464339	

Tabla 8. Impedancia Equivalente (Max. Generación)

IMPEDANCIAS EQUIVALENTES PARA MINIMA GENERACION			
Secuencia	R+jX [Ohms]	R+jX [p.u.]	X/R=
Zeq(+)=	1.4034 +j9.5848	0.0294763 +j0.2013195	6.8299
Zeq(0)=	2.2790 +j 21.2547	0.0478683 +j0.4464339	

Tabla 9. Impedancia Equivalente (Min. Generación)

#### 4.4 Resultados del Estudio de Cortocircuito

Barra	Máxima Generación		Mínima Generación	
	F. Trifásica [A]	F. Línea-Tierra [A]	F. Trifásica [A]	F. Línea-Tierra [A]
Barra 69 kv	4485,37	3055,39	4152,47	2947,51
Barra 13.8 kv	7398	8250,77	7184,26	8083,78
Gyc 1	6982,7	7175,73	6797,93	7059,59
Fusibles 1	6534,23	6194,27	6378,26	6116,76
Fusibles 1.1	6005,52	5220,72	5880,65	5174,36
Gyc 1.1	6630,34	6393,76	6469,26	6309,24
Gyc 2	7030,42	7278,24	6841,03	7157,05
Gyc 2.1	6708,49	6537,6	6539,62	6446,86
Fusibles 2	6582,6	6275,81	6421,89	6194,99
Fusibles 2.1	6342,84	5798,94	6196,34	5734,67
Gyc 2.2	5938,97	5086,59	5815,36	5043,99
Fusibles 2.2	5614,06	4578,89	5508,23	4549,49
Fusibles 3	4932,86	3663,13	4857,93	3652,08
Fusibles 3.1	4452,57	3109,17	4396,01	3106,61
Gyc 4	4671,37	3336	4597,71	3333,39
Fusible 4	4553,46	3246,55	4485,43	3245,7
Fusible 4.1	4142,42	2770,15	4088,6	2776,23
Fusible 4.2	3714,88	2367,35	3677,21	2377,99

Tabla 10. Resultados del Estudio de Cortocircuito

### 5. Estudio de Coordinación

Los estudios de flujo de carga y corto circuito de la Sub. Guayacanes son la base para el ajuste y coordinación de las Protecciones del Sistema.

#### 5.1 Esquema de Protecciones de la Subestación

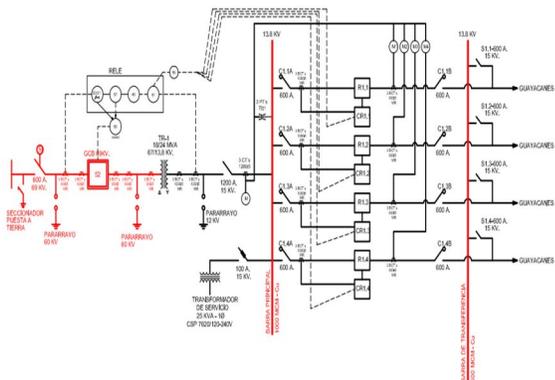


Figura 5.1 Esquema de Protecciones de la Subestación Guayacanes.

### 5.2 Protección de la Subestación

#### Patio de 69 [KV]

Seccionador de Aire con Cuchillas de Tierra.- Marca MEMCO, Corriente Continúa 600 [A], Corriente de Interrupción Instantánea 40 [KA], BIL 350 KV.

Portafusibles.- Marca S&C, Tipo SMD-1.

Fusibles.- Puentes.

Interruptor en Gas SF6 (GCB) Marca ABB.- Corriente Continua 2000[A], Corriente de Interrupción Máxima 40[KA], BIL 350[KV].

Transformador de Poder

Pararrayos sobre el transformador del lado de alta tensión de marca HITACHI, Voltaje nominal 60[KV], MCOV 50[KV].

Pararrayos sobre el transformador del lado de baja tensión de marca HITACHI, Voltaje nominal 12[KV], MCOV 10[KV].

#### Patio de 13.8 [KV]

Seccionador de Aire Principal Marca MEMCO.- Voltaje nominal 15[KV], Corriente Continua de 1200[A], Corriente de Interrupción Instantánea 61[KV], BIL 110[KV].

Posee 4 Reconectores marca COOPER aislados en aceite de tipo WE.- Voltaje nominal 14.4 [KV], Corriente Continua de 560[A], Corriente de Interrupción máxima de 10[KV], BIL 110[KV]. Cada alimentador posee una cuchilla seccionadora marca MEMCO con una Corriente Continua de 600[A], Corriente de Interrupción Instantánea 40[KA], BIL 110[KV] además de fusibles tipo K aguas debajo de la alimentadora.

### 5.3 Ajuste de las Protecciones

Puesta en Trabajo del Transformador de Poder

Lado de Alta Tensión  $1.3 \cdot I_n$

Lado de Baja Tensión  $1.3 \cdot I_n$   
 Puesta en Trabajo de Equipos aguas abajo del Transformador de Poder

Disparo Instantáneo de Sobrecorriente  $I_{FALLaMAX}$   
 Reconectador  $1.5 \cdot I_n$   
 Fusibles  $I_{FALLaMAX}$

### 5.3.1 Ajuste del 87T

Curva de característica diferencial de porcentaje

Error de los Transformadores de Corriente 5%  
 Error debido a la Corriente Inrush 5%  
 Transformador con cambiadores de Taps 10%  
 Error Intrínseco de la Pendiente 3.9%  
 Total 23.9%

### 5.3.2 Ajuste del Relé de Secuencia Negativa

La corriente de secuencia negativa es igual al 58% de la corriente en alta y baja, basándonos en la Norma ANCI C50.12.

## 5.4 Coordinación

La corriente de arranque del 51 se la ha calibrado de tal forma que el transformador trabajara no solo en condiciones nominales, sino también sobrecargado.

El tiempo de operación fue coordinado con los tiempos de los equipos de protección aguas abajo al transformador de poder.

### 5.5 Resumen de la Coordinación

	51 Lado de Alta	51 Lado de Baja
TAP	2.2	5.5
$I_{ajuste}$	34.4[A]	34.4[A]

	50 Lado de Alta	50 Lado de Baja
$I_{Falla}$	4485.77[A]	8250.77[A]

Td	1.5
Intervalo de Coordinación	0.24[s]

Tabla 11. Resumen de la Coordinación

## 5.6 Curvas de Coordinación

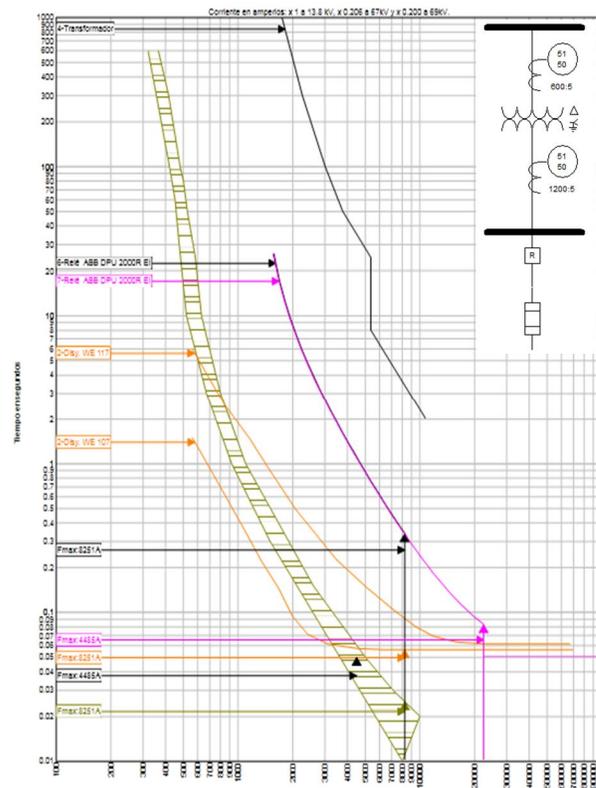


Figura 5.2 Curvas de Coordinación

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

El estudio de flujo de carga determinó que las líneas se encuentran cargadas a menos del 50% de su capacidad nominal. Esta condición permite la transferencia de carga entre alimentadoras, sin presentar problemas de voltaje o sobrecarga.

El transformador de la subestación (18/24 MVA) se encuentra cargado al 83.8% de su capacidad nominal lo que indica que esta en un buen punto de operación, y mantiene un margen de reserva razonable.

De acuerdo al estudio de Cortocircuito que obtuvo que los valores máximos de las corrientes de cortocircuito se presentan para el caso de demanda máxima.

La coordinación de las protecciones proviene de los estudios de flujo de carga y cortocircuito que son fundamentales para la correcta selección y ajuste

de los equipos de protección que permitirá brindar una mejor calidad de energía eléctrica al usuario.

Se recomienda realizar revisiones constantemente al sistema y la instalación de interruptores en las alimentadoras que poseen un alto índice de fallas según los datos estadísticos de las zonas falladas, ya que este dispositivo puede operar como interruptor de fallas o con las opciones adecuadas, se puede integrar a un sistema SCADA.

### **Bibliografía**

[1] Institute of Electrical & Electronics Engineers, (Instituto de Ingenieros eléctricos y electrónicos; IEEE) "IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers".

[2] ABB Substation Automation and Protection. "Manual de Instrucciones Unidad de Protección de Transformadores ABB 2000R".

[3] GENERAL ELECTRIC; Distribution System Feeder "Overcurrent Protection".

[4] McGraw-Edison; Distribution System Protection Manual "Capítulo 6".

[5] José Layana Chancay "Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia" ESPOL – 2010.

[6] International Standard; IEC 60044-1.